

Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Agronomía - Programa de Magister en Ciencias Agronómicas

Influencia de las condiciones microclimáticas bajo túnel alto sobre respuestas fisiológicas y productivas en arándano (*Vaccinium corymbosum* L.)



Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agronómicas
Mención en Producción Vegetal

JORGE ANDRÉS RETAMAL SALGADO
CHILLÁN-CHILE
2014

Profesor Guía: Dr. Richard M. Bastías Ibarra
Dpto. de Producción Vegetal, Facultad de Agronomía
Universidad de Concepción

INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES MICROCLIMÁTICAS BAJO TÚNEL ALTO SOBRE RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS EN ARÁNDANO (*VACCINIUM CORYMBOSUM L.*)

Aprobada por:

Richard M. Bastías Ibarra
Ing. Agrónomo, Mg. Sc., Dr. — Profesor Guía

Rosemarie L. Wilckens Engelbreit
Lic. en Biología, Dr. rer. nat. — Profesor Asesor

Leandro Paulino
Ing. Forestal, Mg. Sc., Dr. — Profesor Asesor

Inés Figueroa Cares
Ing. Agrónomo, Mg. Cs., Dr. — Directora de Programa

TABLA DE CONTENIDOS



ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS



INFLUENCIA DE LAS CONDICIONES MICROCLIMÁTICAS BAJO TÚNEL ALTO SOBRE RESPUESTAS FISIOLÓGICAS Y PRODUCTIVAS EN ARÁNDANO (*VACCINIUM CORYMBOSUM L.*)

INFLUENCE OF MICROCLIMATIC CONDITIONS UNDER HIGH TUNNEL ON PHYSIOLOGICAL AND PRODUCTIVE RESPONSES IN BLUEBERRY (*VACCINIUM CORYMBOSUM* L.)

I. RESUMEN

La producción de arándanos protegidos bajo túnel se ha masificado en los últimos años. Sin embargo, existe poca información sobre respuestas productivas y fisiológicas del arándano cultivado bajo túnel, lo que dificulta definir programas de manejo agronómico bajo esta condición de microclima particular de cultivo. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de las condiciones de microclima bajo túnel alto sobre respuestas productivas y fisiológicas en arándano. Para ello, un total de 1296 plantas de un huerto comercial de arándano cv. O'Neal (*Vaccinium corymbosum* L.) fueron cubiertas con túnel alto, dejando la misma cantidad de plantas al aire libre (control). Tanto al interior como exterior del túnel se evaluaron variaciones de temperatura (T, °C) y humedad relativa (HR, %) ambiental, radiación fotosintéticamente activa total y difusa (PAR_{total} y PAR_{difusa}, µmol m^{-2} s^{-1}), conductancia estomática (g_s, mmol m^{-2} s^{-1}) y máxima eficiencia fotoquímica del fotosistema II (F_v/F_m) de la hoja, además del rendimiento, precocidad y tasa de crecimiento de frutos. Bajo túnel alto la T máxima fue entre 10 – 12° C mayor al control, mientras que la T mínima fue en promedio 2 – 5 °C superior. La HR mínima bajo túnel fue 10 y 20 % más baja en comparación a la condición al aire libre. El túnel redujo, en promedio, en un 25% la intensidad de PAR_{total} y aumentó sobre un 150 % los niveles de PAR_{difusa}. La g_s fue entre un 42 a 99 % más alta bajo túnel alto en comparación al control. La F_v/F_m de la hoja no se afectó por los tratamientos, aunque fue levemente inferior en plantas bajo túnel. Se encontró una relación positiva y estadísticamente significativa (r^2= 0,69**) entre g_s y PAR_{difusa}, pero no entre g_s y PAR_{total} (r^2= $0,1^{n.s.}$). Bajo túnel alto el rendimiento

acumulado por planta superó en un 44 % al control, iniciándose la cosecha 14 días antes. Los resultados de este estudio sugieren que el túnel alto aumenta el rendimiento y la precocidad de la producción en arándanos como consecuencia del aumento de la temperatura durante el periodo de floración, cuajado y desarrollo de frutos. Las condiciones particulares de luz bajo túnel estarían favoreciendo una mayor conductancia estomática de la hoja en este cultivo.

Palabras claves: cultivos protegidos, condiciones de luz, temperatura, productividad, *V. corymbosum*

II. ABSTRACT

Blueberry production under tunnels has spread in recent years. However, there is little information on the productive and physiological responses of blueberry grown under high tunnels, making difficult to define agricultural management plans. The objective of this research was to evaluate the effect of high tunnel microclimate on the physiological and productive responses of blueberry. For this, a total of 1296 plants from a high bush blueberry commercial orchard cv. O'Neal (*Vaccinium corymbosum* L.) were covered by high tunnels, while the same amount of plants of the same cultivar were grown in open fields (control). Variations in temperature (T, ° C) and environmental relative humidity (RH, %), diffuse and photosynthetically active radiation (PAR_{difusa} and PAR_{total}, µmol m^{-2} s^{-1}), stomatal conductance (g_s, mmol m^{-2} s^{-1}) and maximum photochemical efficiency of photosystem II (F_v/F_m) of the leaf were measured inside and outside the tunnel. Fruit yield, precocity and fruit growth rate were also determined.

The maximum T was between 10 and 12° C higher in the high tunnel than the control, whereas the minimum T averaged 2-5° C higher. Minimum RH in the tunnel was 10 and 20 % lower compared with the open field. PAR_{total} intensity decreased an average of 25 % under tunnel, while levels of $PAR_{difusse}$ increased more than 150 %. Stomatal conductance was between 42 and 99% higher in high tunnel compared to the control. The F_v/F_m ratio of the leaf was not affected by the treatments and it was slightly lower in plants grown under tunnel. There was a

positive and statistically significant relationship (r^2= 0.69**) between g_s and $PAR_{difusse}$, but no difference was found between g_s and PAR_{total} (r^2= 0.1). Blueberries under high tunnel recorded an accumulated yield 44 % higher, while harvest started 14 days earlier compared to open field production. The results of this study suggest that the use of high tunnels in blueberries increases fruit yield and improves precocity due to higher temperatures during the flowering stage, fruit set and fruit development. Particular light conditions under tunnels would favor higher leaf stomatal conductance in this crop.

Key words: protected crops, light conditions, temperature, productivity, *V. Corymbosum*

III. INTRODUCCIÓN

La producción de arándanos protegidos en invernaderos o túneles de plástico se ha masificando en los últimos años para evitar daños causados por heladas primaverales durante la floración y fructificación, así como también por lluvias en época de cosecha, y cuya técnica podría ser cada vez más necesaria para mitigar efectos adversos del cambio climático en frutales (Carlen y Krüger, 2009; Demchak, 2009). Además, con túnel alto es posible lograr una mayor precocidad de producción y cubrir la demanda inicial de fruta, alcanzando mejores precios para el productor (Demchak, 2009). La protección de los cultivos bajo plástico (polietileno), ya sea con túneles altos o invernaderos, genera cambios en las condiciones ambientales de luz, temperatura y humedad relativa (Lamont, 2005) y, como consecuencia, deberían afectarse aspectos productivos y fisiológicos en la planta (Li et al., 2012). Este fenómeno se ha demostrado en especies no leñosas, tales como cultivos ornamentales y hortalizas (Ortiz et al., 2012; Zhao et al., 2014). Sin embargo, existe poca información sobre cambios fisiológicos y productivos en cultivos leñosos, como el arándano cultivado bajo túnel alto (Lamont, 2005; Demchak, 2009). Se ha observado que en túneles altos la temperatura del aire aumenta, fluctuando entre 3 a 20° C respecto a la temperatura en el exterior,

mientras que la temperatura del suelo varía entre 2 a 5° C superior a las registradas en el exterior (Ogden y Van Lersel, 2009; Zhao et al., 2014). En otros cultivos, tales como tomate y frutilla, el incremento de la temperatura en el túnel influye directamente sobre la precocidad productiva, al adelantar entre 7 a 21 días el inicio de cosecha, en comparación con huertos al aire libre (Wien, 2009, Singh et al., 2012; Cowan et al., 2014; Zhao et al., 2014). En frutillas cultivadas bajo túnel se ha registrado un aumento de la temperatura de 2 a 3° C y de la humedad relativa del 2 al 6 % (Singh et al., 2012). La temperatura, en conjunto a la humedad relativa, juega un rol importante en la conductancia estomática (g_s) de la hoja, y de esta forma afectando la tasa de transpiración y fotosíntesis de la planta (Jones, 1998; Righi et al., 2012).

Por otra parte, los plásticos de polietileno que se utilizan comúnmente para cubrir invernaderos o túneles pueden reducir entre un 20 y 30 % la transmisión de luz fotosintéticamente activa (PAR) con respecto a la luz incidente en condiciones no protegidas (Cowan et al., 2014). Se ha mencionado que una disminución de la disponibilidad de luz PAR puede ser un factor limitante en la producción de cultivos bajo plástico, al disminuir la tasa de fotosíntesis, además de probables efectos negativos sobre el rendimiento y la calidad de la producción (Challa y Shapendonk, 1984; Sandri et al., 2003). No obstante, en arándanos una disminución de un 40 % en la intensidad de luz PAR no afecta la eficiencia fotosintética de plantas sometidas a esta reducción en la cantidad de luz (Lobos et al., 2012). En otras especies frutales se ha propuesto que una reducción en los niveles de radiación afecta positivamente la fotosíntesis neta de la planta, al incrementar la g_s y la concentración de CO_2 intercelular (Corelli-Grappadelli y Lakso, 2007). En cítricos se ha demostrado que la capacidad fotosintética puede mejorar al disminuir la PAR, reduciéndose la foto-inhibición por exceso de luz, con lo cual consecuentemente mejora la eficiencia fotoquímica del fotosistema II (Medina et al., 2002). Una disminución de la disponibilidad de luz PAR también puede inducir respuestas fotomorfogenéticas asociadas al fenómeno conocido como "shade avoidance", cuya respuesta es regulada por la actividad de los fitocromos (Franklin, 2008). En árboles frutales los cambios morfológicos

asociados al fenómeno de “shade-avoidance” se expresan como elongación de brotes, incremento de la dominancia apical y reducción del grosor de la hoja (Bastías et al., 2012). Además, una reducción en la intensidad de PAR altera la razón de partición de foto-asimilados, por lo cual en brotes a la sombra la exportación de foto-asimilados se retrasa en 3 semanas en relación a aquellos brotes expuestos a plena luz, con efectos sobre el crecimiento de frutos (Corelli-Grappadelli, 2003).

De acuerdo a lo señalado el uso de túnel afecta las condiciones micro-climáticas del cultivo, disminuyendo la disponibilidad de luz, incrementando la temperatura y la humedad relativa del aire (Singh et al 2012, Cowan et al., 2014) lo que debiera tener efectos directos sobre respuestas productivas y fisiológicas del cultivo. Sin embargo, a la fecha existe poca información sobre estas respuestas en arándanos cultivados bajo túnel alto, dificultando, establecer prácticas de manejo agronómico para este cultivo bajo esta condición de microclima particular. El objetivo de la presente investigación fue evaluar el efecto de las condiciones de microclima bajo túnel alto sobre los siguientes aspectos en arándano: i) conductancia estomática y fluorescencia de la clorofila en hojas, ii) crecimiento del fruto, iii) rendimiento y precocidad de la producción.

IV. MATERIALES y MÉTODOS

Diseño del experimento y manejo del huerto

El estudio se llevó a cabo durante la temporada 2011/2012, en un predio ubicado en la Región del Biobío, Chile (37° 6' 31" S, 72° 2 5' 57" W). El ensayo se realizó en un huerto comercial de arándano alto cv. O'Neal (*Vaccinium corymbosum* L.) plantado el año 2010 en un tipo de suelo franco arenoso.

Se estableció un tratamiento sobre una estructura metálica construida en diseño de túnel alto de 5,5 m de ancho, 51 m de largo y 3,5 m de altura. Se utilizaron cuatro túneles cubiertos con una lámina de polietileno de 200 µm de espesor y con una capacidad de transmisión de la luz PAR del 85 %, luz infrarroja de 13 % (IR) y de dispersión de la luz visible del 60 %, que cubrieron un total de 1296 plantas. Los túneles fueron diseñados con ventanas correderas en las paredes laterales

para facilitar la eliminación de calor y ventilación, que se abrieron manualmente cuando la temperatura interior alcanzó los 21° C y se cerró en las tardes al disminuir la temperatura bajo 10° C. A partir del 15 de noviembre las paredes laterales se mantuvieron abiertas en forma permanente.

Para cada tratamiento se usó un total de 4 platabandas de tres hileras y plantados con un espaciamiento de 0,45 m x 0,45 m (11.000 plantas ha^{-1}). El tratamiento control incluyó la misma cantidad de platabandas, filas y número de plantas, pero creciendo bajo condiciones al aire libre. El experimento fue conducido en un diseño completamente al azar, considerando un total de 6 plantas de la hilera central de cada una de las platabandas por tratamiento, completando un total de 24 plantas por tratamiento (repeticiones), las que fueron marcadas con una cinta de plástico rígido, codificada. Ambos tratamientos fueron manejados en forma similar en cuanto al control fitosanitario, fertilización y riego. Para mejorar la efectividad de la polinización, ésta fue apoyada por la introducción de colmenas de abejorros (Natupol™, colmena clase C, Koppert Biological Systems, Holanda).

Caracterización de las condiciones ambientales

En el exterior como al interior de los túneles se registró la temperatura del aire (℃) y la humedad relativa (HR, %) a intervalos de 15 minutos, utilizando sensores automáticos modelo Key Tag (KeyTag Recorders, EE.UU.). La variación de las condiciones lumínicas fue cuantificada en términos de radiación fotosintéticamente activa total (PAR_{total}) y difusa (PAR_{difusa}), utilizando un sensor quantum modelo Delta T (Delta-T Devices Ltda., Cambridge, UK). Para ello se cuantificó la densidad de fotones fotosintéticamente activa (PPFD, µmol m^{-2} s^{-1}) en tres momentos del día: 9:00 h, 12:00 h y 15:00 h, bajo la condición ambiental de un día completamente soleado y otro nublado. La cantidad de PAR_{difusa} fue estimada según el método adaptando y propuesto por Al-Helal y Abdel-Ghany (2010), colocando un disco opaco a una distancia de 50 cm del sensor PAR, cubriendo este con la sombra del disco en un 100 %.

Fluorescencia de la clorofila y conductancia estomática

Durante un día a pleno sol y otro nublado, y en tres momentos del día (9:00, 12:00 y 15:00 horas) se midió la intensidad máxima de la fluorescencia (F_m) y la intensidad mínima de fluorescencia (F_o) de la clorofila a través de un fluorómetro portátil modelo OS-30p (Opti-Sciences, EE.UU.), mientras que la fluorescencia variable ($F_v = F_m – F_o$) se cuantifico según Kooten y Snell (1990). Las mediciones se realizaron en hojas bien iluminadas, maduras y de brotes anuales ubicados en el segundo tercio de la ramilla. Tanto F_o como F_m se determinaron después de que las hojas fueron adaptadas a plena oscuridad durante 30 minutos (Reyes-Díaz et al., 2009; Inostroza-Blancheteau et al., 2011), utilizando para ello clips foliares con una placa de obturación móvil. Con éstos parámetros se cuantificó la máxima eficiencia fotoquímica del fotosistema II (F_v/F_m), utilizando la siguiente relación propuesta por Kooten y Snell (1990) y Maxwell y Johnson (2000): $F_v/F_m = (F_m–F_o) /F_m$. El grado de fotoinhibición se cuantificó mediante la relación F_v/F_m en distintos momentos del día en relación con el valor registrado en la mañana. En forma simultánea a las mediciones de parámetros de fluorescencia de clorofila se midió la conductancia estomática (g_s, mmol m^{-2} s^{-1}) utilizando para ello un porómetro portátil modelo AE4 (Delta-T Devices Ltda., Cambridge, UK). Las mediciones de g_s se realizaron en hojas completamente iluminadas en las mismas plantas y brotes utilizados para las mediciones de fluorescencia de clorofila.

Tasa de crecimiento de frutos

En cada planta de cada tratamiento se marcaron 5 frutos elegidos al azar. Se midió el diámetro ecuatorial de frutos (D, mm) desde 04 hasta 54 días después de plena flor (DDPF), usando un pie de metro digital, con +/- 0,03 mm de precisión (Electronic Digital Caliper, Altraco, Inc., EE.UU.). Para convertir los valores de diámetro de frutos a peso fresco de frutos (P, g) se utilizó la metodología propuesta por Palmer et al. (1997) y validada por Zibordi et al. (2009) y Bastías et al. (2012). Con este fin se cosechó una muestra de 20 frutos en forma simultánea

a las mediciones de campo. El diámetro de los frutos se medió con un pie de metro digital y se determinó su peso en una balanza de precisión Precisa (Precisa instruments AG, Dietikon, Suiza). Con estos parámetros se obtuvo la siguiente ecuación $P = (a + bx^2)^2$, donde a y b fueron 0,180872 y 0,00473021, respectivamente, x corresponde al diámetro ecuatorial del fruto, $r^2 = 0,95$. La tasa de crecimiento absoluta (TCA, g dia^{-1}) y relativa (TCR, mg g^{-1} dia^{-1}) de frutos fue estimada a través de las siguientes relaciones: TCA = $(Pt_1 - Pt_0) / (t_1 - t_0)$; TCR = TCA/Pt_0 (Zibordi et al., 2009; Morandi et al., 2010) donde Pt_1 y Pt_0 son los valores de peso de frutos estimados en un momento determinado (t_1) y en el muestreo anterior (t_0), respectivamente.

Rendimiento y tamaño de fruto a la cosecha

Al momento de iniciar la cosecha se cuantificó el número y peso total de frutos por planta. La cosecha de los frutos se realizó en forma escalonada de manera de evaluar el efecto de los tratamientos sobre el rendimiento estacional de fruta.

El análisis estadístico

El efecto de los tratamientos se estimó mediante un análisis de varianza simple (ANOVA) con un nivel de significancia estadística del 0,05 y 0,01. El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el software Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies, Inc., Warrenton-Virginia, USA).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Condiciones ambientales

En la Figura 1 se presentan los datos de temperatura máxima y mínima registrada para ambos tratamientos. Se observa que a los 23 DDPF (periodo cercano a pinta o envero) la temperatura máxima al interior del túnel se incrementó en 12° C respecto al aire libre (Figura 1A), lo que coincide con lo registrado por Kadir et al. (2006) y Both et al. (2007), quienes observaron que las temperaturas máximas en el interior del túnel alto fueron hasta 14° C super iores. Durante los meses de primavera (08 DDPF) tendieron a aumentar entre 1 a 5° C las temperaturas

mínimas en el interior de los túneles altos comparado con la condición al aire libre (Figura 1B). Estos resultados coinciden con lo registrado por Wien (2009). Esta tendencia se invirtió desde los 56 DDPF, dado que a partir de la segunda quincena de noviembre se abrieron permanentemente las ventanas laterales, observándose un alza de temperaturas mínimas entre 4 a 8° C al aire libre respecto a aquella registrada en el túnel alto (Figura 1B).

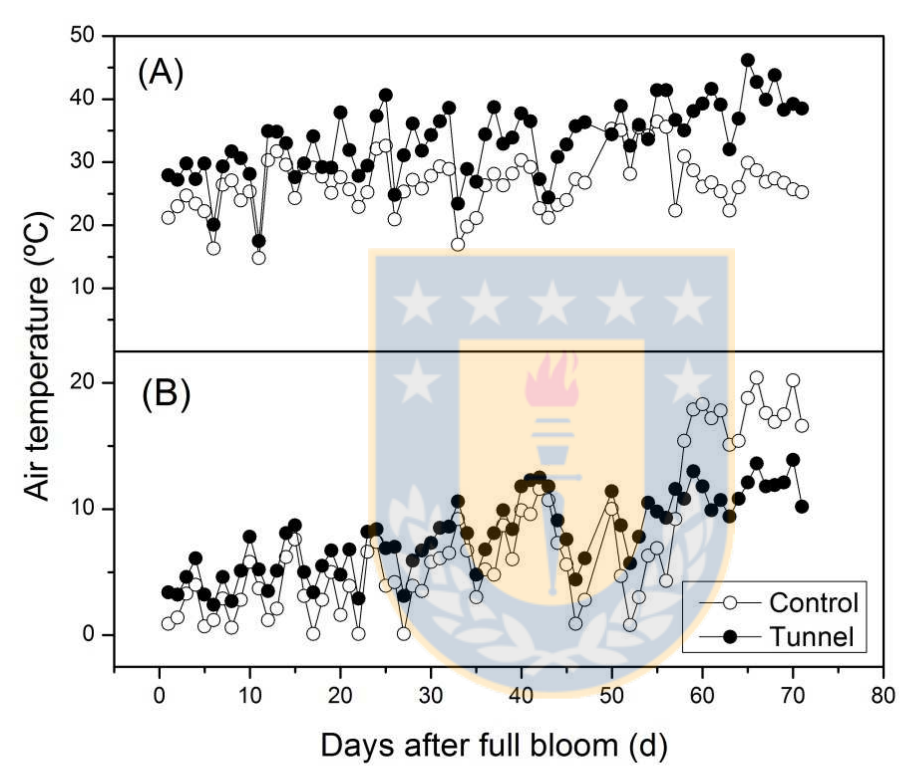


Figura 1. Variación de la temperatura máxima (A) y mínima (B) del aire registrada en túneles altos y al aire libre (control) durante la temporada de crecimiento 2011-2012 en Cabrero, Región del Bío - Bío, Chile.

La temperatura mínima promedio (Figura 1B) bajo túnel durante los meses de floración y desarrollo de frutos (10 a 55 DDPF) fue 2° C más alta a la temperatura mínima registrada al aire libre (control). Este es un aspecto relevante, ya que en arándano el periodo más vulnerable a bajas temperaturas (daño por heladas) se ha descrito entre inicio de floración y caída de pétalos (Michigan State University, 2012), es decir, durante el periodo de fruto recién cuajado, que es cuando este

puede resultar dañado con temperaturas cercanas a 0° C. Wien (2009) y Santos y Salame-Donoso (2012) indican que el uso de túnel es una técnica efectiva para proteger a la planta frente a temperatura cercana o bajo 0° C. En el presente estudio las temperaturas más bajas al aire libre bordearon los 0° C en 5 ocasiones (Figura 1B). Así, el túnel permitió proteger de 5 eventuales heladas durante el desarrollo de flores y frutos.

De la misma manera, un aumento de las temperaturas mínimas bajo túnel alto favorecerían la fecundación y el cuajado de frutos, ya que el umbral para el vuelo de agentes polinizantes, tales como *Apis mellifera,* fluctúa entre 10 y 27° C (Cooper y Schaffer, 1985), y sobre 5° C en abejorro s (*Bombus* spp.) (Aras et al., 1996). Esta mayor actividad de los agentes polinizantes aumenta significativamente el tamaño y la tasa de maduración de los frutos (Javorek et al., 2002). Además, al interior del túnel se observó un menor número de eventos con temperaturas bajo el umbral de vuelo de los agentes polinizadores, factor relevante, ya que el periodo de plena receptividad de la flor es aproximadamente de cinco días (Brevis et al., 2006).

Los valores de HR máxima fueron similares entre el interior del túnel y al aire libre (Figura 2A), moviéndose en valores promedios de 99 % para ambas condiciones. En el caso de la HR mínima (Figura 2B), este patrón fue distinto, donde bajo túnel fue 10 a 20 % más baja en comparación a la condición al aire libre (control) y dicha tendencia se observó en todo el periodo de crecimiento del cultivo. Lo anterior no coincide con los resultados obtenidos por Singh et al. (2012) quienes indicaron que la HR en cultivos bajo túnel, en general, es superior a aquellos cultivados al aire libre. Cabe señalar que una baja HR, a pesar de la reducción de la energía radiante (PAR_{total}) combinada a una alta temperatura en el interior del túnel, podría estar aumentando el déficit de presión de la atmósfera y de esta manera la demanda evapotranspirativa del cultivo (Allen et al., 2006)

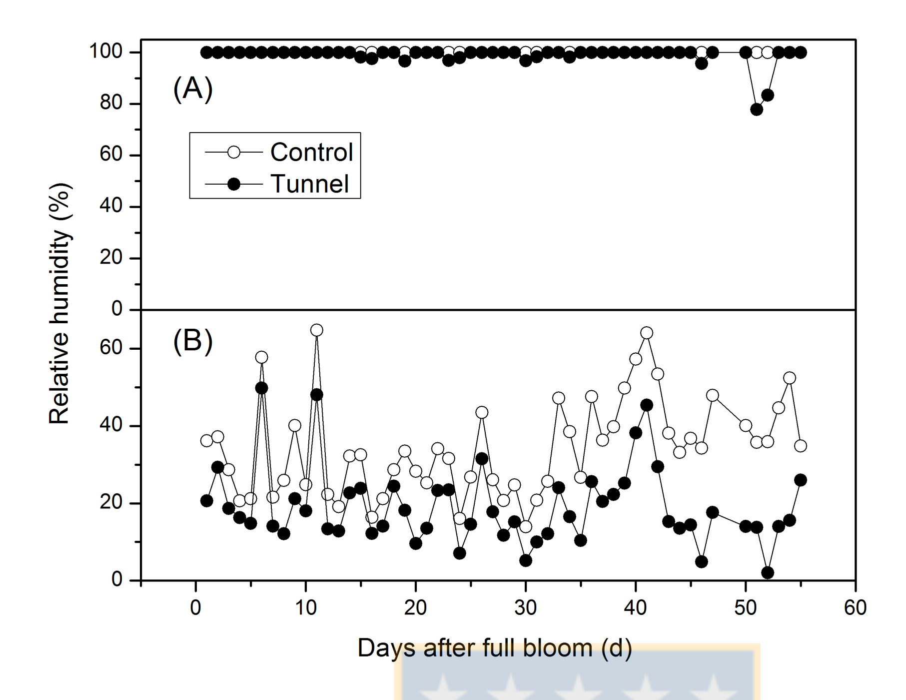


Figura 2. Variaciones de humedad relativa máxima (A) y mínima (B) del aire registrada en túneles altos y al aire libre (control) durante la temporada de crecimiento 2011-2012 en Cabrero, Región del Bío – Bío, Chile.

Radiación, conductancia estomática y fluorescencia de clorofila

En condiciones de día soleado el túnel redujo, en promedio, en un 25 % la intensidad de radiación PAR_{total} medida como densidad de flujo de fotones fotosintéticamente activos (PPFD) (Figura 3A). Por el contrario, en un día parcialmente nublado (Figura 3B) no existieron diferencias significativas en la intensidad de PAR entre los tratamientos, a excepción a las 16:30 h, donde se apreció una reducción del 25 % de intensidad de PAR_{total} bajo túnel. Estos valores de reducción de PAR_{total} estarían por debajo a los niveles medidos por Lobos et al. (2012) y Kim et al. (2011) en arándano bajo malla, por lo cual la fotosíntesis no debería verse afectada.

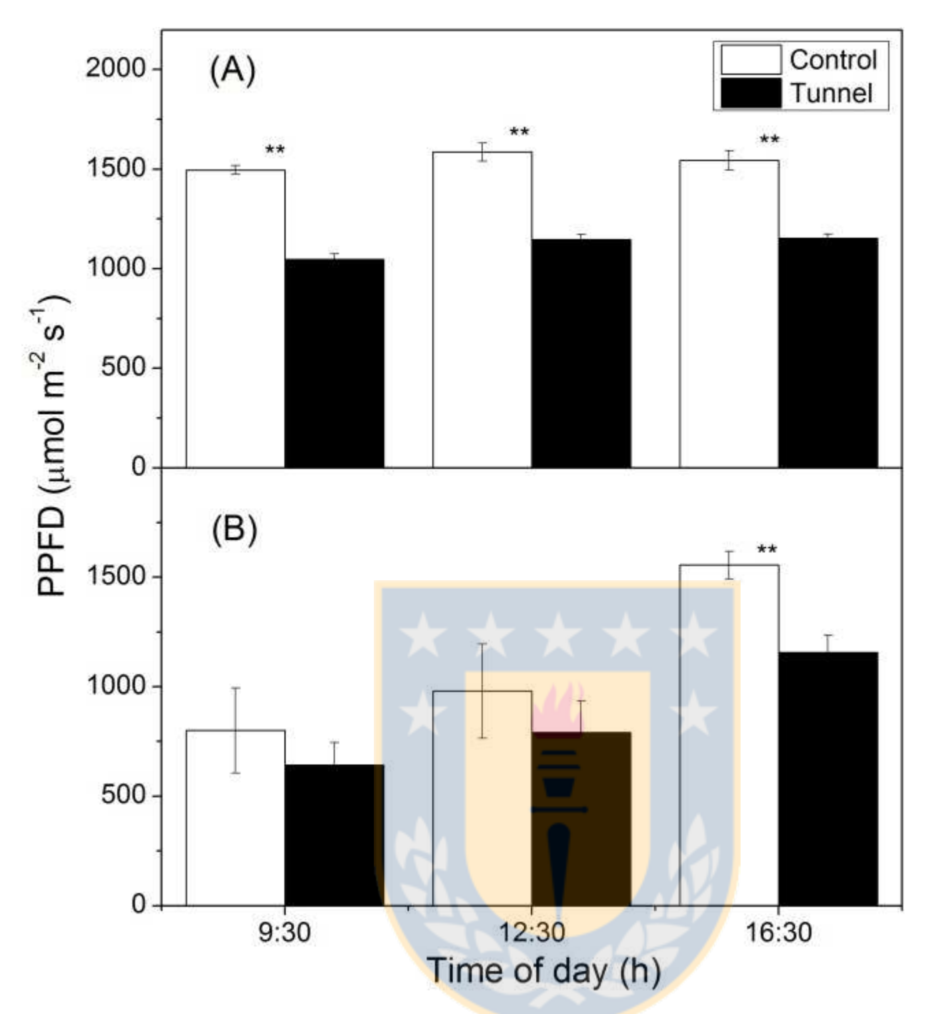


Figura 3. Cambios diurnos de PAR_{total} en densidad de fotones fotosintéticamente activa (PPFD, µmol m^{-2} s^{-1}) (a distintas horas del día) en arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control) en un día completamente soleado (A) y otro parcialmente nublado (B). Las barras verticales corresponden a +/- el errores estándar de la media (n= 10), ** medias diferentes (P < 0,01).

A partir de los datos de fluorescencia de la clorofila (Figura 4), el promedio calculado de la máxima eficiencia fotoquímica del PSII (F_v/F_m) en hojas aclimatadas a la oscuridad en un día completamente soleado bajo túnel y al aire libre fue de 0,75 y 0,77 respectivamente (Figura 4A), y para un día nublado (Figura 4B) bajo túnel y al aire libre fue de 0,76 y 0,77 respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, salvo en un día

completamente soleado al medio día. La combinación de alta radiación y alta temperatura también puede afectar a la eficiencia fotosintética (Barber y Anderson, 1992), como una foto-inhibición (Demmig-Adams, 1990). Se ha observado una correlación entre la foto-inhibición y la disminución de la relación de fluorescencia máxima del fotosistema II (PS II), es decir, la relación F_v/F_m (Bolhàr-Nordenkampf y Öquist, 1993).

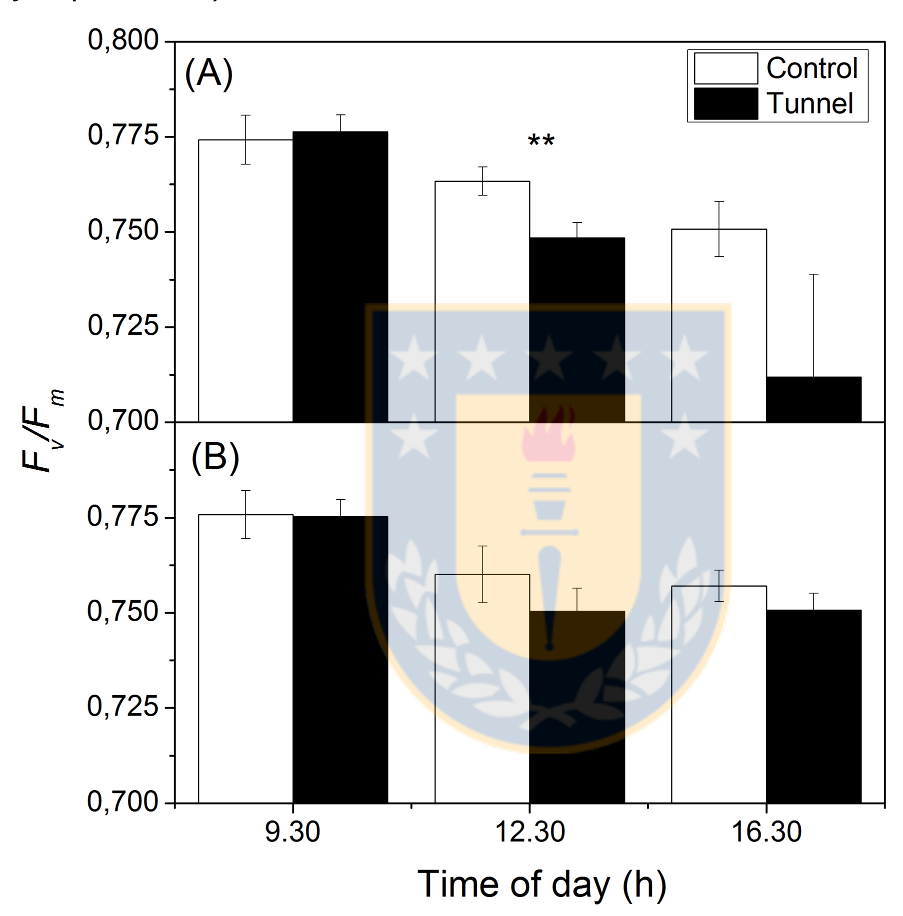


Figura 4. Rendimiento cuántico del fotosistema II adaptado a oscuridad (a distintas horas del día) en arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control) en un día completamente soleado (A) y otro parcialmente nublado (B). Las barras verticales corresponden a +/- el errores estándar de la media (n= 10), ** y * medias diferentes (** P < 0,01 y * P < 0,05).

Las variaciones diarias de la relación F_v/F_m indican que las plantas al aire libre (control) y en túnel presentaron foto-inhibición, ya que los valores fueron disminuyendo durante el día (Figura 4A y B). No obstante, en las plantas al aire libre, los valores de F_v/F_m permanecieron más cercanos a los valores a 0.8, lo que indicaría que bajo túnel existiría un mayor grado de foto-inhibición respecto al tratamiento control y en especial en un día completamente soleado, lo cual puede atribuirse a altos niveles de PAR_{total} asociados a una mayor temperatura ambiental (Figura 1 y 3). Como demostraron Ogren y Evans (1992) y Kitao et al. (2000) el aumento de temperatura de las hojas incrementa la susceptibilidad a la foto-inhibición. Del mismo modo, la disminución diurna de la relación F_v/F_m en las plantas control probablemente dependió de los niveles de PAR_{total} asociados a altas temperaturas, alcanzando valores mínimos alrededor de 16:30 h (Figura 3).

Sin embargo, la disminución de la relación F_v/F_m (Figura 4 A y B) simultáneamente con el aumento de la temperatura (Figura 1 A y B) y de PAR_{total} (Figura 3A y B) no coincidió con el aumento de la conductancia estomática bajo túnel alto (Figura 5), tanto en un día soleado como nublado. Para un día soleado el valor promedio de g_s bajo túnel fue un 99 % superior a la condición sin túnel (Figura 5A), mientras que para un día parcialmente nublado este valor fue un 42 % mayor (Figura 5B). Una mayor conductancia estomática es un indicador de mayor capacidad de intercambio gaseoso de la hoja, incluyendo la asimilación de CO_2 y transpiración de la planta (Jones, 1998; Rho et al., 2012). No obstante, estos altos niveles de conductancia estomática no pueden ser atribuidos a las condiciones de temperatura (Figura 1) y humedad relativa (Figura 2) medidas bajo túnel, puesto que se ha observado que un incremento de la temperatura y disminución de la humedad relativa promueven, por lo general, un cierre estomático de la hoja en distintas especies de árboles frutales (Jones y Lakso, 1995). Los niveles de radiación PAR_{difusa} fueron significativamente mayores bajo túnel en comparación al control (Figura 6). En un día soleado la cantidad de PAR_{difusa} fue sobre un 200 % superior en túnel alto en comparación al aire libre (Figura 6A), mientras que para un día parcialmente nublado fue de más de 150 % superior bajo túnel alto que en el tratamiento control (Figura 6B). Este incremento de luz difusa bajo invernadero

o túneles ha sido mencionado en otros trabajos, observando que el material de polietileno utilizado promueve una mayor descomposición de la luz directa en difusa, lo que ha resultado beneficioso para la fotosíntesis y productividad en cultivos hortícolas (Li et al., 2014).

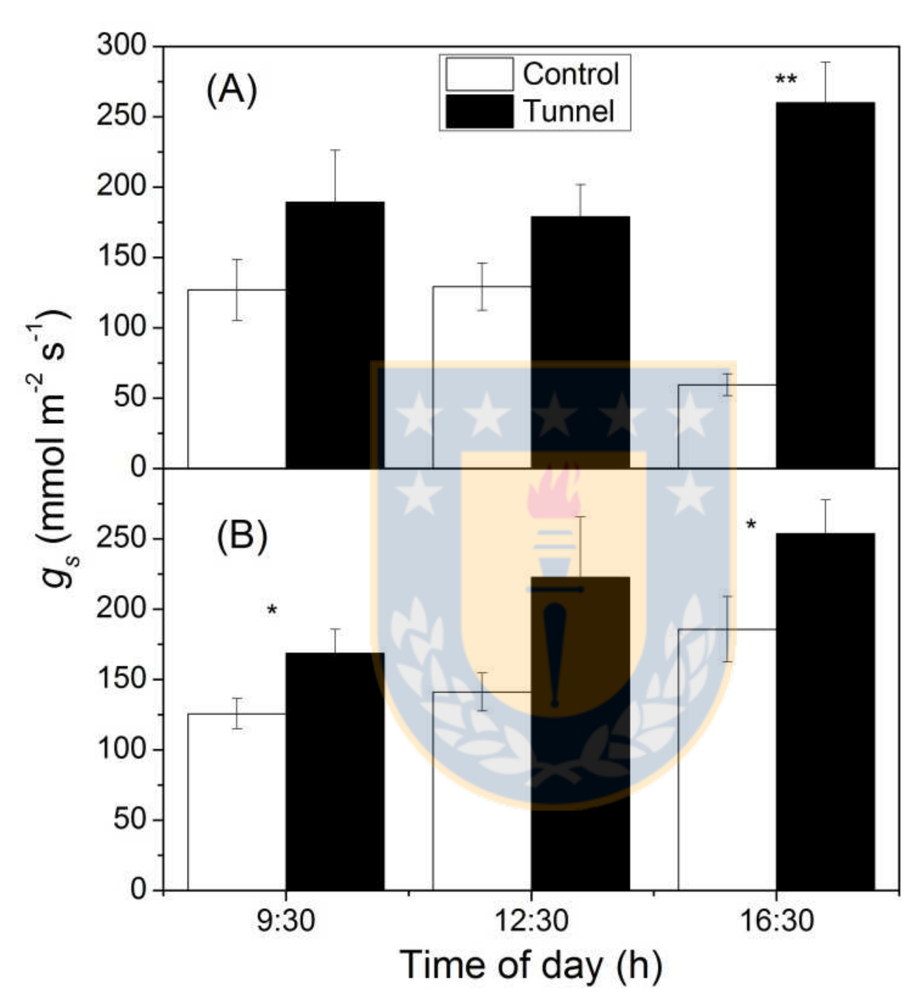


Figura 5. Cambios diurnos de la conductancia estomática (mmol m^{-2} s^{-1}) (a distintas horas del día) en arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control) en un día completamente soleado (A) y otro parcialmente nublado (B). Las barras verticales corresponden a +/- el errores estándar de la media (n= 10), ** y * medias diferentes (** P < 0,01 y * P < 0,05).

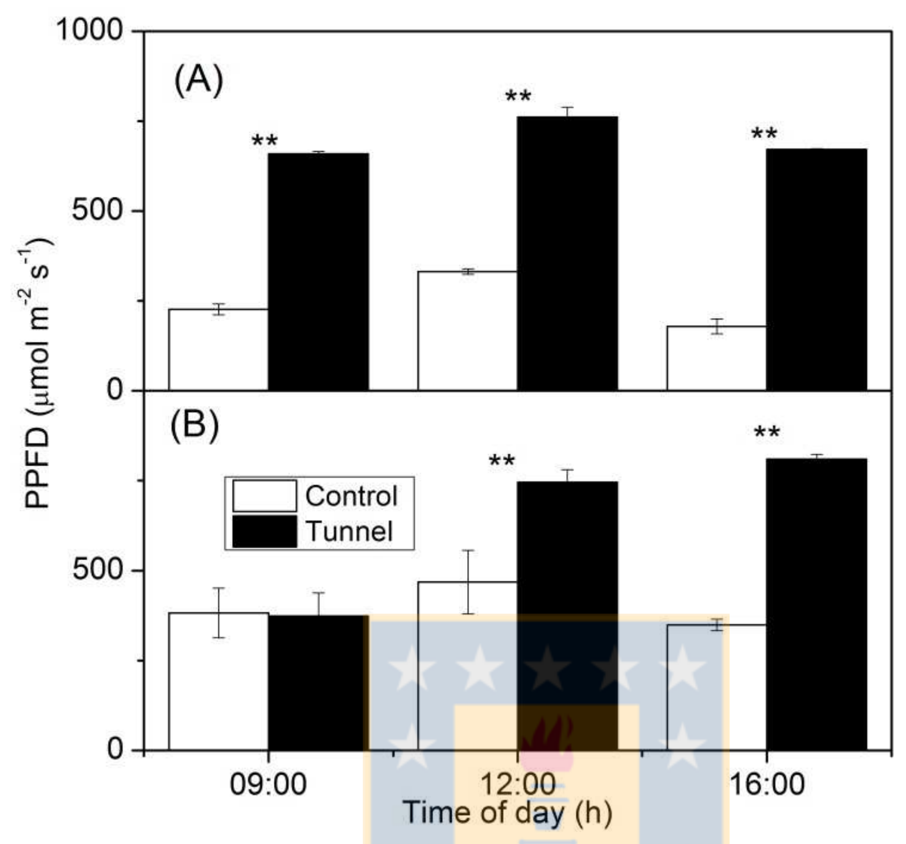


Figura 6. Cambios diurnos de PAR_{difusa} en densidad de fotones fotosintéticamente activa (PPFD, µmol m^{-2} s^{-1}) (a distintas horas del día) en arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control) en un día completamente soleado (A) y otro parcialmente nublado (B). Las barras verticales corresponden a +/- el errores estándar de la media (n= 10), ** medias diferentes (** $P < 0,01$).

De acuerdo al análisis de regresión se encontró una relación estadísticamente significativa (r^2 = 0,66**) entre la cantidad de PAR_{difusa} y la conductancia estomática de la hoja, no así en relación a la cantidad de PAR_{total} (Figura 7). Estos resultados son concordantes con estudios recientes que indican que una mayor distribución de fotones de luz difusa mejoran el intercambio gaseoso de la hoja (Li et al., 2014). El efecto positivo del componente de radiación difusa sobre la tasa intercambio gaseoso neto de árboles puede deberse a varios aspectos: da origen a condiciones micro-climáticas favorables para la planta (reducción de la temperatura de la hoja), a través de la estimulación de apertura estomática vía un

incremento en la proporción de luz azul/roja, o a través de la mayor penetración y distribución de luz al interior de la canopia de la planta (Urban et al., 2007; Hemming et al., 2008). En este contexto, en próximas investigaciones será interesante estudiar cómo estas condiciones particulares de luz difusa que se originan bajo túneles afectan la fotosíntesis y transpiración en arándanos.

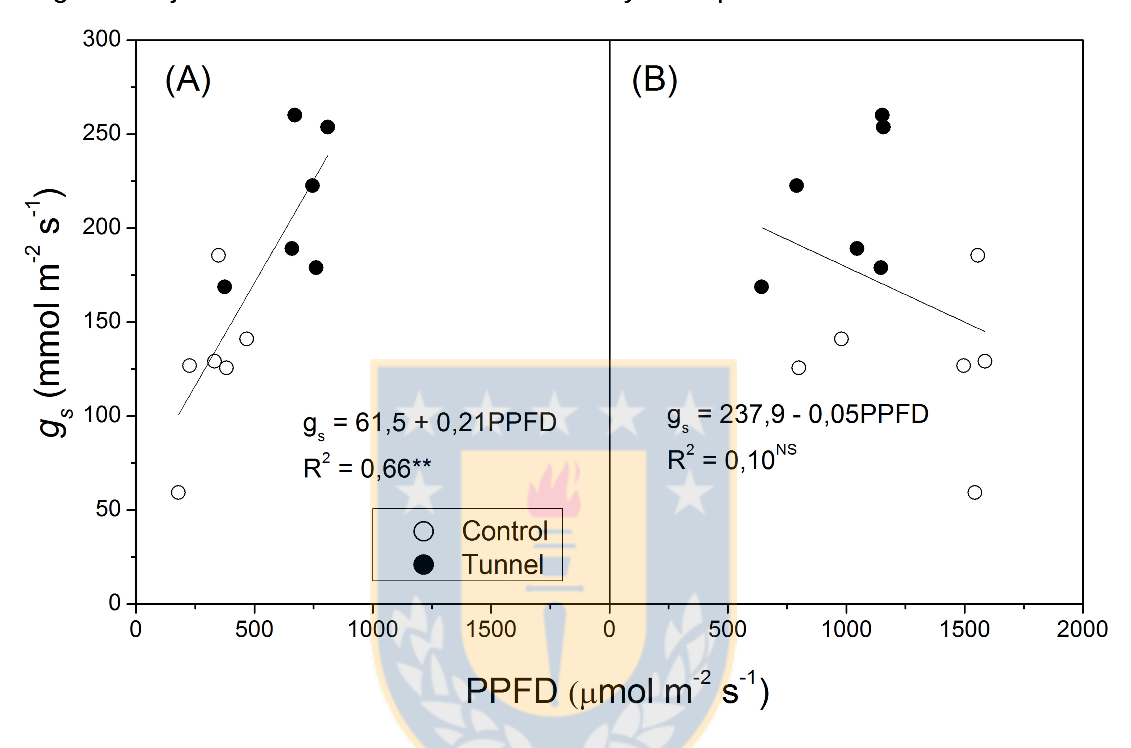


Figura 7. Respuesta de la conductancia estomática (g_s, mmol m^{-2} s^{-1}) a la intensidad de PAR_{difusa} (A) y PAR_{total} (B) en densidad de fotones fotosintéticamente activa (PPFD, µmol m^{-2} s^{-1}) para arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control), ** P< 0,01.

El crecimiento de los frutos

La duración total del período de desarrollo del fruto en este estudio fue aproximadamente de 53 a 66 días (Figura 8). Estos resultados concuerdan con lo señalado por Retamales y Hancock (2012) quienes indican que el período total de desarrollo del fruto oscila entre 55 a 60 días en arándano, y el cual se ajusta al patrón de crecimiento del fruto del tipo doble sigmoideo, típico en esta especie (Godoy et al., 2008). Durante la primera fase de crecimiento, entre 6 a 11 DDPF,

no se observó un efecto del túnel sobre la tasa crecimiento absoluta (TCA) y tasa de crecimiento relativa (TCR) del fruto, no obstante, entre 11 y 20 DDPF la TCA y TCR fue significativamente mayor bajo túnel en comparación al control (Figura 8A y B). Sin embargo, a partir de los 20 DDPF, tanto los valores de TCA y TCR fueron significativamente menor bajo túnel alto que al aire libre.

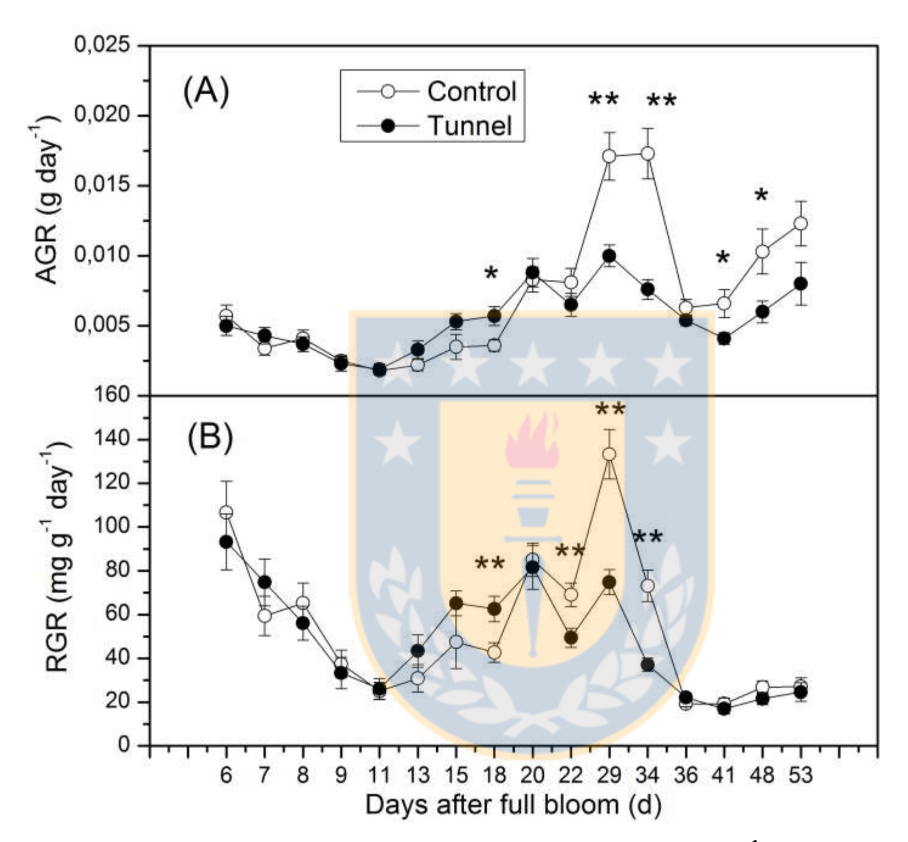


Figura 8. Tasa de crecimiento absoluto (TCA) (g día^{-1}) (A) y tasa de crecimiento relativo (TCR) (mg g^{-1} día^{-1}) (B) del fruto en arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control).). Las barras verticales corresponden a +/- el errores estándar de la media (n= 10), ** y * medias diferentes (** P < 0,01 y * P < 0,05).

Se ha reportado que condiciones de alta temperatura y baja humedad relativa, como las observadas bajo túnel en este estudio (Figura 1 y 2), estarían reduciendo la tasa de expansión del fruto debido a una mayor transpiración directa de la fruta como consecuencia de altos niveles de déficit de presión de vapor o la excesiva demanda evaporativa y reducido potencial hídrico de la hoja (Lang, 1990).

Estudios recientes desarrollados en cerezo demuestran que la TCA del fruto está estrechamente relacionada con la expansión celular del fruto (Bastías et al., 2014), lo que demostraría que las condiciones de alta temperatura y baja humedad relativa bajo túnel podrían estar afectando negativamente la tasa de expansión celular del fruto de arándano en su última fase de crecimiento (Figura 8). Por otra parte, la cantidad de frutos por planta bajo túnel fue significativamente mayor (Tabla 1), lo que tiene un efecto directo sobre la repartición de carbohidratos hacia los frutos y por lo tanto sobre la tasa de crecimiento de ellos. Una mayor cantidad de fruta por planta implicaría una reducción de la TCA y TCR como ha sido medido en otras especies frutales como manzano y duraznero (Zibordi et al., 2009; Monardi et al., 2010)

Rendimiento y precocidad de la producción

La cosecha de frutos producidos bajo túnel se inició a los 38 DDPF, es decir, 14 días antes respecto a la producción de arándano al aire libre (Figura 9A). El rendimiento acumulado por planta bajo túnel fue significativamente mayor y superó en un 44 % a aquel alcanzado al aire libre (Figura 9A; Tabla 1). La condición de cultivo bajo túnel también incidió sobre el número de frutos, que se incrementó en un 65 % respecto al aire libre (Figura 9B; Tabla 1). Lo anterior concuerda con lo expuesto por Santos y Salame-Donoso (2012), quienes señalan que el incremento de rendimiento de berries bajo túnel se explicaría por una mejor fecundación y mayor cuajado de frutos debido al incremento de la temperatura mínima como se ha demostrado en la presente investigación (Figura 1). Asimismo, en la Figura 9 se aprecia que el 42 % del total de frutos producidos bajo túnel alto ya se habían cosechado cuando se inició la cosecha bajo condiciones al aire libre. También Ogden y Van Larsel (2009) señalan que el túnel alto modifica las condiciones climáticas, adelantando la floración y la maduración del fruto y promueve la producción temprana de fruta.

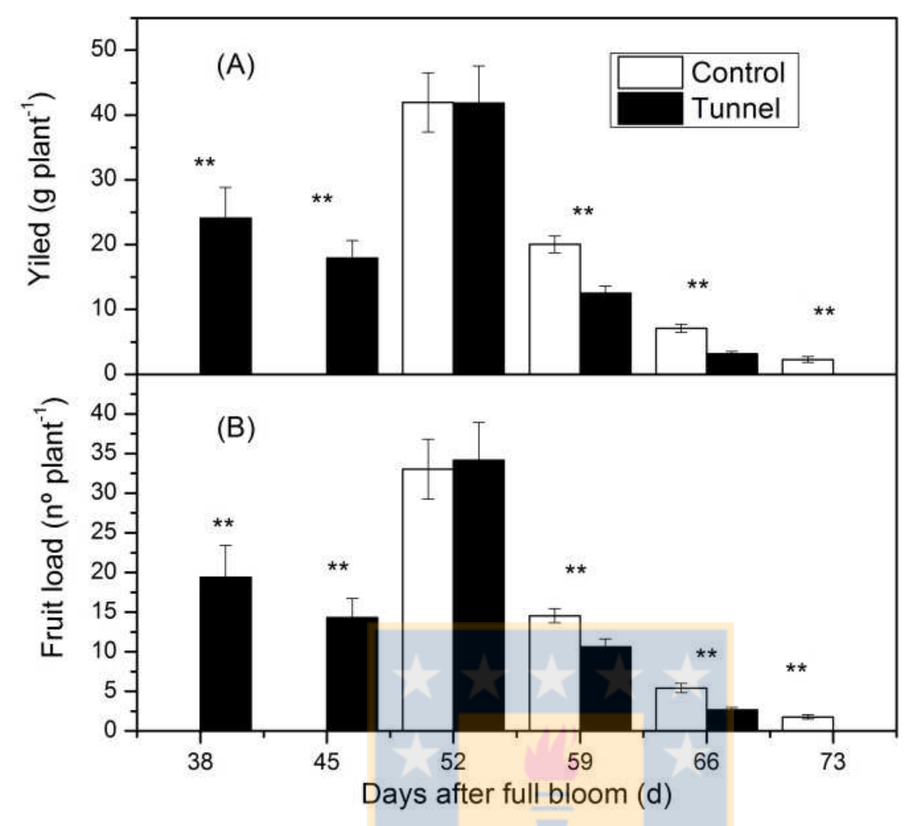


Figura 9. Distribución de cosecha según rendimiento (g planta^{-1}) (A) y numero de frutos (n° planta $^{-1}$) (B) en arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control).). Las barras verticales corresponden a +/- el errores estándar de la media (n= 10), ** medias diferentes (** P < 0,01).

Cabe destacar que no se observaron diferencias significativas entre túnel alto y al aire libre (Figura 9B) en el peso medio de fruto, cuyos valores fueron 1,2 y 1,3 g, respectivamente (Tabla 1). Esto indica que aunque se observaron diferencias significativas en TCR y TCA del fruto (Figura 8A y B) esto no se vio reflejado en el peso final del fruto a cosecha (Tabla 1). En otras especies de frutos, tales como manzanas, cerezas y duraznos se ha determinado que el tamaño final de la fruta es resultante de la variación estacional en la TCA y TCR (Morandi et al., 2010; Bastías et al., 2012). En este estudio se observó que entre 11 y 20 DDPF los valores de TCA y TCR fueron significativamente mayor bajo túnel, lo que podría estar compensando en parte la pérdida de peso parcial registrada en los frutos luego de 20 DDPF (Figura 8).

Tabla 1. Componentes de rendimiento de arándano establecido bajo túnel alto y al aire libre (control). (n=12), significancia a ** P < 0,01; n.s. = no significativo.

Tratamientos	Componentes de rendimientos		
	Rendimiento acumulado (g planta^{-1})	Peso del fruto (g)	N° Frutos (frutos planta^{-1})
Túnel	99,5	1,2	81
Control	69,0	1,3	53
Significancia	**	n.s.	**

VI. CONCLUSIONES

Los resultados de este estudio demuestran que:

1. La técnica de cultivo de arándano bajo túnel alto es una herramienta efectiva para aumentar el rendimiento y la precocidad de la producción, al incrementar la temperatura durante el periodo de floración, cuajado y desarrollo de frutos.
2. Las condiciones particulares de radiación solar bajo túnel (incremento de PAR difusa) estarían favoreciendo la conductancia estomática de la hoja.
3. Las condiciones de alta temperatura y baja humedad relativa registrada bajo túnel afectan negativamente la tasa de expansión del fruto durante su última fase de crecimiento, no obstante este efecto no fue suficiente para afectar el peso final de fruto al momento de cosecha.

VII. REFERENCIAS

1. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes D. and Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Roma, Italia.
2. Al-Helal, I. M. and Abdel-Ghany, A. M. 2010. Responses of plastic shading nets to global and diffuse PAR Transfer: Optical properties and evolution. Wageningen Journal of Life Science 57:125-132.
3. Aras, P., Oliveira, D. and Savoie, L. 1996. Effect of a honey bee (Hymenoptera: Apidae) gradient on the pollination and yield of lowbush blueberry. J. Econ. Entomol. 89(5): 1080-1083.
4. Barber, J. and Anderson, B. 1992. Too much of a good thing: light can be bad for photosynthesis. Trends in Biochemical Sciences. 17: 61–66.
5. Bastías, R. M., Manfrini, L. and Corelli-Grappadell, L. 2012. Exploring the potential use of photo-selective nets for fruit growth regulation in apple. Chilean J. Agric. Res. 72(2): 224-231.
6. Bastías, R. M., Diez, F. and Finot, V. L. 2014. Absolute and relative growth rates as indicators of fruit development phases in sweet cherry *Prunus avium*. Chilean J. Agric. Anim. Sci. 30:89-98.
7. Both, A. J., Reiss, J. F., Sudal, K. E., Holmstrom, C. A., Kline, W. L. and Garrison, S.A. 2007. Evaluation of a manual energy curtain for tomato production in high tunnels. HortTechnology 17 (4): 467-472.
8. Bolhàr-Nordenkampf, H. R. and Öquist, G. 1993. Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research. Pp. 193-206. In: Hall, D. O., Scurlock, J. M. O., Bolhàr-Nordenkampf, H. R., Leegood, R. C. and Long, S. P. (Eds). Photosynthesis and production in a changing environment. Springer, Londres, Inglaterra.
9. Brevis, P. A., NeSmith, D. S., Wetzstein, H. Y. and Hausman, D. B. 2006. Flower age affects fruit set and stigmatic receptivity in rabbiteye Blueberry. HortScience 41: 1537-1540.

10. Carlen, C. and Krüger, E. 2009. Berry production in changing climate conditions and cultivation systems: further research requirements. Acta Hort. 838: 225-228.
11. Challa, H., and Schapendonk, A.H.C.M. 1984. Quantification of effects of light reduction in greenhouses on yield. Acta Hort. 148: 501-510.
12. Cooper, P. D. and Schaffer, W. M. 1985. Temperature regulation of honey bees (*Apis mellifera*) foraging in the Sonoran Desert. J. Exp. Biol. 114: 1-15.
13. Corelli-Grappadelli, L. 2003. Light relations, p. 195 – 216. In: D.C. Ferree and I.J. Warrington (eds). Apples: Botany, production and uses. CAB International. Wallingford, Reino Unido.
14. Corelli-Grappadelli, L. and Lakso, A.N. 2007. Is maximizing orchard light interception always the best choice?. Acta Hort.:732: 507 – 518.
15. Cowan, J. S., Miles, C. A., Andrews, P. K. and Inglis, D. A. 2014. Biodegradable mulch performed comparably to polyethylene in high tunnel tomato (*Solanum lycopersicum* L.) production. J. Sci. Food Agric. 94: 1854 – 1864.
16. Demchak, K. 2009. Small fruit production in high tunnels. HortTechnology 19 (1): 44 – 49.
17. Demmig-Adams, B.1990. Carotenoids and photoprotection in plants: A role for the xanthophyll zeaxanthin. Biochimica et Biophysica Acta 1020: 1-24.
18. Franklin, K. 2008. Shade avoidance. New Phytologist 179: 930 – 944.
19. Godoy, C., Monterubbianesi, G. and Tognetti, J. 2008. Analysis of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) fruit growth with exponential mixed models. Scientia Horticulturae 115: 368–376.
20. Hemming, S., Duek, T., Janse, J. and van Noort, F. 2008. The effects of diffuse light on crops. Acta Horticulturae. 801: 1293 – 1300.
21. Inostroza-Blancheteau, C., Reyes-Díaz, M., Aquea, F., Nunes-Nesi, A., Alberdi, M., and Arce-Johnson, P. 2011. Biochemical and molecular changes in response to aluminium-stress in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). Plant Physiol. Bioch. 49: 1005-1012.

22. Javorek, S. K., Mackenzie, K. E. and Vander Kloet, S. P. 2002. Comparative pollination effectiveness among bees (Hymenoptera: Apoidea) on lowbush blueberry (Ericaceae: *Vaccinium angustifolium*). Annals of the Entomological Society of America 95(3): 345-351.

23. Jones, H. G. 1998. Stomatal control of photosynthesis and transpiration. J. Exp. Bot. 49: 387-398.

24. Jones, H. G. and Lakso, A. N. 1995. Physiological control of water status in temperate and subtropical fruit trees. Horticultural Reviews 7: 301-344.

25. Kadir, S., Carey, E., and Ennahli, S. 2006. Influence of high tunnel and field conditions on strawberry growth and development. HortScience 41: 329-335.

26. Kim, S.J., Yu, D. J., Kim, T., and Lee, H. J., 2011. Growth and photosynthetics of blueberry (*Vaccinium corymbosum* cv. Bluecrop) under various shade levels. Scientia Horticulturae 129: 486-492.

27. Kitao, M., Lei, T. T., Koike, T., Tobita, H. and Maruyama, Y. 2000. Susceptibility to photoinhibition of three deciduous broadleaf tree species with different successional traits raised under various light regimes. Plant, Cell & Environment. 23: 81-89.

28. Kooten, O. and Snel, J.H. 1990. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology. Photosynthesis Research 25: 147-150.

29. Lamont, W. J. 2005. Plastics: Modifying the microclimate for the production of vegetable crops. HortTechnology 15: 477–481.

30. Lang, A. 1990. Xylen, phloem and transpiration flows in developing apple fruits. Journal of Experimental Botany, 41 (227): 645 – 651.

31. Li, X, Chen, W. and Li, Y. 2012. Study on photosynthetic characteristics of blueberry in greenhouse. Acta Horticulturae 926: 315-320.

32. Li, T., Heuvelink, E., Dueck, T. A., Janse, J., Gort, G. and Marcelis, L. F. M. 2014. Enhancement of crop photosynthesis by diffuse light: quantifying the contributing factors. Annals of Botany 114: 1-12.

33. Lobos, G. A., Retamales, J. B., Hancock, J.F., Flore, J A., Cobo, N. and del Pozo, A. 2012. Spectral irradiance, gas exchange characteristics and leaf traits of *Vaccinium corymbosum* L. “Elliott” grown under photo-selective nets. Environ. Exp. Bot. 75: 142-149.
34. Maxwell, K. and Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence: A practical guide. J. Expt. Bot. 51: 659–668.
35. Medina, C. L., Souza, R. P., Machado, E. C., Rivero, R. V. and Silva, J. A. B. 2002. Photosynthetic response of citrus grown under reflective aluminized polypropylene shading nets. Scientia Horticulturae 96: 115–125.
36. Michigan State University Extension. 2012. Las etapas de crecimiento del arándano. [en línea] <http://blueberries.msu.edu/ growing_blueberries /growth_stages_table>. Fecha consulta: 21 de junio 2013.
37. Morandi, B., Losciale, P., Manfrini, L., Zibordi, M., Corelli-Grappadelli, L. 2010. Comprendere come cresce il frutto per migliorarne la qualità. Riv. Fruttic. Ortofloric. 72(7-8): 36-42.
38. Ogden, A. B. and Van Lersel, M. W. 2009. Southern highbush blueberry production in high tunnels: temperatures, development, yield, and fruit quality during the establishment years. HortScience 44 (7): 1850-1856.
39. Ogren, E. and Evans, J. R. 1992. Photoinhibition of photosynthesis *in situ* in six species of *Eucalyptus*. Australian Journal of Plant Physiology 19: 223 – 232.
40. Ortiz, M. A., Hyresyk, K. and Lopez, R. G. 2012. Comparison of high tunnel and field production of specialty cut flowers in the Midwest. HortScience 47 (9): 1265-1269.
41. Palmer. J.W., Giuliani, R. and Adams, H. 1997. Effect of crop load on fruiting and leaf photosynthesis of ‘Braeburn’/M26 apple trees. Tree Physiology 17: 741 – 746.
42. Retamales, J. B. and Hancock, J. F. 2012. Blueberries. CABI. Cambridge, USA.

43. Reyes-Diaz, M., Alberdi, M. and Mora, M. L. 2009. Short-term aluminum stress differentially affects the photochemical efficiency of photosystem II in highbush blueberry genotypes. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 134: 14-21.

44. Righi, E. Z., Buriol, G. A., Angelocci, L. R., Heldwein, A. B. and Tazzo, I. F. 2012. Relationships of photosynthetic photon flux density, air temperature and humidity with tomato leaf diffusive conductance and temperature. Braz. Arch. Biol. Technol. 55: 359-370.

45. Rho. H., Yu, J. D., Kim, S. J. and Lee, J. H. 2012. Limitation factors for photosynthesis in ‘Bluecrop’ highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum*) leaves in response to moderate water stress. J. Plant Biol. 55: 450 - 457.

46. Sandri, M. A., Andriolo, J. L., Witter, M. and Dal Ross, T. 2003. Effect of shading on tomato plant grower under greenhouse. Horticultura Brasileira 21: 642-645.

47. Santos, B. M. and Salame-Donoso, P. T. 2012. Performance of southern highbush blueberry cultivars under high tunnels in Florida. HortTecnology 22: 700 – 702.

48. Singh, A., Syndor, A., Deka, B. C., Singh, R. K. and Patel, R. K. 2012. The effect of microclimate inside low tunnels on off-season production of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). Scientia Horticulturae 144: 36-41.

49. Urban, O., Janouš, D., Acosta, M., Czerny, R., Markova, I., Navratil, M., Pavelka, M., Pokorný, R., Šprtová, R., Zhang, R., Špunda, V., Gracia, J. and Marek, M. V. 2007. Ecophysiological controls over the net ecosystem exchange of mountain spruce stand. Comparison of the response in direct vs. diffuse solar radiation. Global Change Biology 13: 157-168.

50. Wien, H. C. 2009. Microenvironmental variations within the high tunnel. HortScience 44: 235-238.

51. Zhao, Y., Gu, M., Bi, G. Evans, B. and Harkess, R. 2014. Planting date effect on yield of tomato, eggplant, pepper, zinnia, and snapdragon in high tunnel in Mississippi. Journal of Crop Improvement 28 (1): 27-37.

52. Zibordi, M., Domingos S. and Corelli-Grappadelli, L. 2009. Thinning apples by shading: an appraisal under field conditions. Journal of Horticultural Science and Biotechnology. (ISAFRUIT special issue): 138 – 144.

